

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2004/013451

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER  
Int.Cl' G01S17/88, G01P5/00, G01W1/00

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl' G01S17/88, G01P5/00, G01W1/00

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched  
Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2004  
Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2004 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2004

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2003-240852 A (Mitsubishi Electric Corp.), 27 August, 2003 (27.08.03), Full text; all drawings (Family: none)	1-7
Y	JP 4-133533 A (Yokogawa Electric Corp.), 07 May, 1992 (07.05.92), Full text; all drawings (Family: none)	1-7
Y	JP 63-266382 A (Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.), 02 November, 1988 (02.11.88), Full text; all drawings (Family: none)	1-7

 Further documents are listed in the continuation of Box C. See patent family annex.

• Special categories of cited documents:	
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	"&" document member of the same patent family
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search  
04 October, 2004 (04.10.04)Date of mailing of the international search report  
19 October, 2004 (19.10.04)Name and mailing address of the ISA/  
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**

International application No.

PCT/JP2004/013451

**C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 63-71675 A (Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.), 01 April, 1988 (01.04.88), Full text; all drawings (Family: none)	1-7
A	JP 3-252586 A (Litton Systems, Inc.), 11 November, 1991 (11.11.91), & US 4995720 A & EP 432887 A3 & CA 2025008 A & AU 625478 B	1-9

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))  
Int C1' G01S 17/88, G01P 5/00, G01W 1/00

## B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))  
Int C1' G01S 17/88, G01P 5/00, G01W 1/00

## 最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報 1922-1996年  
日本国公開実用新案公報 1971-2004年  
日本国登録実用新案公報 1994-2004年  
日本国実用新案登録公報 1996-2004年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

## C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
Y	JP 2003-240852 A (三菱電機株式会社) 2003. 08. 27, 全文, 全図 (ファミリなし)	1-7
Y	JP 4-133533 A (横河電機株式会社) 1992. 05. 07, 全文, 全図 (ファミリなし)	1-7
Y	JP 63-266382 A (松下電器産業株式会社) 1988. 11. 02, 全文, 全図 (ファミリなし)	1-7

C欄の続きにも文献が列挙されている。

パテントファミリーに関する別紙を参照。

## \* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの  
「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの  
「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)  
「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献  
「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

## の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの  
「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの  
「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの  
「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日  
04. 10. 2004

国際調査報告の発送日 19.10.2004

国際調査機関の名称及びあて先  
日本国特許庁 (ISA/JP)  
郵便番号 100-8915  
東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)  
宮川 哲伸

2S 9208

電話番号 03-3581-1101 内線 3256

C (続き) 関連すると認められる文献		関連する 請求の範囲の番号
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	
Y	JP 63-71675 A (松下電器産業株式会社) 1988.04.01, 全文, 全図 (ファミリなし)	1-7
A	JP 3-252586 A (リットン システムズ インコーポ レイテッド), 1991.11.11 & US 4995720 A & EP 432887 A3 & CA 2025008 A & AU 625478 B	1-9

## 明細書

### 光波レーダ装置

#### 技術分野

[0001] この発明は、パルス光を空間に放出し、空間内のエアロゾル移動に伴うパルス光の散乱光のドップラシフトによる風速を測定する光波レーダ装置に関するものである。

#### 背景技術

[0002] 従来の光波レーダ装置は、光信号を発光する光源と、その光源により発光された光信号を変調してパルス光を出力する光強度変調器と、その光強度変調器により変調されたパルス光を増幅する光増幅器と、その光増幅器により増幅されたパルス光を空間に放出する一方、その空間で散乱されたパルス光の散乱光を収集する光送受信系と、その光源により発光された光信号のローカル部と光送受信系により収集された散乱光をヘテロダイン検波して、風速のドップラ周波数を求めるドップラレーダ用受信回路とから構成されている(例えば、特許文献1参照)。

これにより、光波レーダ装置が例えば飛行機に搭載されれば、飛行機の飛行速度のドップラ周波数をキャンセルして、風速のドップラ周波数を求めることができる。

[0003] ただし、光増幅器により増幅されたパルス光が光ファイバ型の導波路を通じて光送受信系まで伝搬される場合、ファイバコア媒質の非線形効果によってパルス光の強度変化に比例した屈折率変化が生じる。この屈折率変化が発生すると、伝搬中のパルス光の位相が変化する(自己位相変調)。この位相変化はパルス光の強度に比例することが知られている(Kerr効果)。

また、パルス光は時間的に強度が変化するため、その位相が時間的に変化する。時間変化する位相の変化率は周波数変化に対応するので、送信するパルス光の周波数が偏移する。

[0004] さらに、送信するパルス光の周波数が偏移すると、ドップラレーダ用受信回路が測定する風速のドップラ速度(ドップラ周波数に相当)にオフセットが発生する。

例えば、波長 $1.5 \mu m$ のパルス光を送信する場合において、 $1.3 \text{MHz}$ の周波数偏移が発生すると、その周波数偏移は、ドップラ速度 $1 \text{m/s}$ のオフセット誤差に対応

する。

- [0005] 特許文献1:特開2003-240852号公報(段落番号[0016]から[0024]、図1)
- [0006] 従来の光波レーダ装置は以上のように構成されているので、送信するパルス光の周波数が偏移すると、ドップラレーダ用受信回路が測定する風速のドップラ速度にオフセットが発生する。このため、視線方向の風速を高精度に測定することができないなどの課題があった。
- [0007] この発明は上記のような課題を解決するためになされたもので、送信するパルス光に対する周波数偏移を検出して、風速の高精度な測定を可能にする光波レーダ装置を得ることを目的とする。

#### 発明の開示

- [0008] この発明に係る光波レーダ装置は、発光手段により発光された光信号に対する周波数偏移を検出する周波数偏移検出手段を設けるようにしたものである。
- [0009] このことによって、送信するパルス光に対する周波数偏移が検出されるため、その周波数偏移に応じて視線方向の風速を補正するなどの処理が可能になり、風速の高精度な測定が実施できるようになるなどの効果がある。

#### 図面の簡単な説明

- [0010] [図1]この発明の実施の形態1による光波レーダ装置を示す構成図である。
- [図2]波長  $\lambda = 1.5 \mu m$  のパルス光を例にして、各送信パルス幅(0.25  $\mu sec$ , 0.5  $\mu sec$ , 1.0  $\mu sec$ )に対する周波数偏移  $f_{chirp}$  と、式(2)に基づいて計算された速度オフセットである  $\Delta V_{offset}$  の一例を示す説明図である。
- [図3]風速オフセット補正の検証実験に用いた装置を示すレイアウト図である。
- [図4]風速オフセット補正の検証実験結果を示す説明図である。
- [図5]この発明の実施の形態2による光波レーダ装置を示す構成図である。
- [図6]全光ファイバ形光波レーダ装置における送信光の周波数偏移評価系を示すブロック図である。
- [図7]内部反射光のヘテロダイン検出信号の時系列データ(左)と周波数解析結果(右)を示す説明図である。
- [図8]この発明の実施の形態3による光波レーダ装置を示す構成図である。

[図9]周波数偏移 $f_{\text{chirp}}$ の推定手順を示すフローチャートである。

[図10]送信光の出力パルス強度波形を示す説明図である。

[図11]自己位相変調に基づく送信光周波数偏移の算出結果を示す説明図である。

### 発明を実施するための最良の形態

[0011] 以下、この発明をより詳細に説明するために、この発明を実施するための最良の形態について、添付の図面に従って説明する。

#### 実施の形態1.

図1はこの発明の実施の形態1による光波レーダ装置を示す構成図であり、図において、基準光源1は周波数 $\nu$ の光信号を発振し、その光信号を光ファイバ2に出力する。なお、基準光源1は発光手段を構成している。

光ファイバ2は各構成部の間に挿入され、各構成部の出力光を伝搬する光導波手段を構成している。

[0012] 光路分岐部3は基準光源1により発振された光信号を分岐し、その光信号の一部をパルス変調器4に出力する一方、その光信号の一部を局部発振光として光路分岐部9に出力する。

パルス変調器4は光路分岐部3により分岐された光信号を強度変調してパルス光を出力する。

光ファイバ増幅器5はパルス変調器4から出力されたパルス光を増幅する。

[0013] 光方向性結合部6は光ファイバ増幅器5により増幅されたパルス光を光路分岐部7に出力する一方、送受信望遠鏡8により収集された散乱光を光路分岐部9に出力する。

光路分岐部7は光方向性結合部6から出力されたパルス光を分岐し、そのパルス光の大部分を送受信望遠鏡8に出力する一方、そのパルス光の一部を周波数偏移検出部12に出力する。

送受信望遠鏡8は光方向性結合部6により分岐されたパルス光のビーム径を拡大してから、そのパルス光を空間に放出する一方、その空間で散乱されたパルス光の散乱光を収集する。なお、送受信望遠鏡8は光送受信手段を構成している。

[0014] 光路分岐部9は光路分岐部3から出力された局部発振光と光方向性結合部6から

出力された散乱光とを合成し、その合成光をヘテロダイン受信器10に出力する。

ヘテロダイン受信器10は光路分岐部9から出力された局部発振光と散乱光の合成光をヘテロダイン検波して、局部発振光と散乱光の差周波数成分を示す信号を出力する。

ドップラ信号処理部11はヘテロダイン受信器10の出力信号が示す差周波数成分から視線方向の風速を算出する。

なお、光路分岐部3、光方向性結合部6、光路分岐部9、ヘテロダイン受信器10及びドップラ信号処理部11から風速算出手段が構成されている。

[0015] 周波数偏移検出部12は光路分岐部7から出力されたパルス光の一部から、その光信号に対する周波数偏移を検出する。

荷重平均処理部13は周波数偏移検出部12の検出結果の荷重平均を求め、荷重平均後の周波数偏移から系統誤差を求める。

なお、光路分岐部7、周波数偏移検出部12及び荷重平均処理部13から周波数偏移検出手段が構成されている。

減算器14はドップラ信号処理部11により算出された風速から、荷重平均処理部13により求められた系統誤差を減算して、その風速から系統誤差を除去する。なお、減算器14は風速補正手段を構成している。

[0016] 次に動作について説明する。

基準光源1は、周波数  $\nu$  の光信号を発振し、その光信号を光ファイバ2に出力する。

光路分岐部3は、光ファイバ2を介して、基準光源1により発振された光信号を受けると、その光信号の一部をパルス変調器4に出力する一方、その光信号の一部を局部発振光として光路分岐部9に出力する。

[0017] パルス変調器4は、光ファイバ2を介して、光路分岐部3により分岐された光信号を受けると、その光信号を強度変調してパルス光を出力する。

光ファイバ増幅器5は、光ファイバ2を介して、パルス変調器4から出力されたパルス光を受けると、そのパルス光を増幅する。

光方向性結合部6は、光ファイバ2を介して、光ファイバ増幅器5により増幅された

パルス光を受けると、そのパルス光を光路分岐部7に出力する。

光路分岐部7は、光ファイバ2を介して、光方向性結合部6から出力されたパルス光を受けると、そのパルス光を分岐し、そのパルス光の大部分を送受信望遠鏡8に出力する。また、そのパルス光の一部を周波数偏移検出部12に出力する。

[0018] 送受信望遠鏡8は、光ファイバ2を介して、光方向性結合部6により分岐されたパルス光を受けると、そのパルス光のビーム径を拡大してから、そのパルス光を空間に放出する。

送受信望遠鏡8から空間に放出されたパルス光は、空間中の微小塵(エアロゾル)により散乱される。エアロゾルは風速と同速度で移動する性質を有するので、そのパルス光の散乱光は、エアロゾルの移動によりドップラシフト $\Delta f_D$ を受けて、その周波数が $\nu + \Delta f_D$ となる。

送受信望遠鏡8は、空間で散乱されたパルス光の散乱光を収集する。

[0019] 光方向性結合部6は、光ファイバ2を介して、送受信望遠鏡8により収集された散乱光を受けると、その散乱光を光路分岐部9に出力する。

光路分岐部9は、光路分岐部3から周波数 $\nu$ の局部発振光を受け、光方向性結合部6から周波数 $(\nu + \Delta f_D)$ の散乱光を受けると、その局部発振光と散乱光を合成し、その合成光をヘテロダイン受信器10に出力する。

ヘテロダイン受信器10は、光路分岐部9から合成光を受けると、その合成光をヘテロダイン検波して、その合成光の強度の交流成分を検出する。合成光の強度信号には両者の和の周波数成分 $(2\nu + \Delta f_D)$ と差の周波数成分 $\Delta f_D$ が含まれているので、ヘテロダイン受信器10は、差の周波数成分 $\Delta f_D$ のみを電気信号に変換する。

[0020] ドップラ信号処理部11は、ヘテロダイン受信器10から周波数成分 $\Delta f_D$ を示す電気信号を受けると、その電気信号をアナログ/デジタル変換したのち、FFT(Fast Fourier Transform)処理を実施して、スペクトルのピーク値を取る周波数を推定することにより、ドップラ周波数 $\Delta f_D$ を検出する。

そして、ドップラ信号処理部11は、そのドップラ周波数 $\Delta f_D$ を下記の式(1)に代入して、視線方向の風速 $V_w$ を算出する。

$$V_w = \lambda \cdot \Delta f_D / 2 \quad (1)$$

ただし、 $\lambda$  はパルス光の波長である。

[0021] 周波数偏移検出部12は、光路分岐部7からパルス光の一部を受けると、例えば、その光信号の周波数を検波することにより、その光信号に対する周波数偏移 $f_{\text{chirp}}$ を検出する。

荷重平均処理部13は、周波数偏移 $f_{\text{chirp}}$ の検出精度を高めるため、周波数偏移検出部12の検出結果の荷重平均を求める。

なお、周波数偏移 $f_{\text{chirp}}$ によって、ドップラ信号処理部11により算出される風速 $V_w$ には、 $\Delta V_{\text{offset}}$ だけ系統誤差が含まれるので、荷重平均後の周波数偏移 $f_{\text{chirp}}$ から系統誤差 $\Delta V_{\text{offset}}$ を求める。

$$\Delta V_{\text{offset}} = \lambda \cdot f_{\text{chirp}} / 2 \quad (2)$$

減算器14は、荷重平均処理部13が系統誤差 $\Delta V_{\text{offset}}$ を求めるとき、ドップラ信号処理部11により算出された風速 $V_w$ から系統誤差 $\Delta V_{\text{offset}}$ を減算する。

[0022] 以上で明らかのように、この実施の形態1によれば、光信号に対する周波数偏移 $f_{\text{chirp}}$ を検出する周波数偏移検出部12と、その周波数偏移検出部12により検出された周波数偏移 $f_{\text{chirp}}$ から系統誤差 $\Delta V_{\text{offset}}$ を求める荷重平均処理部13とを設け、ドップラ信号処理部11により算出された風速 $V_w$ から系統誤差 $\Delta V_{\text{offset}}$ を減算するように構成したので、風速 $V_w$ の高精度な測定を実施することができる効果を奏する。

[0023] これにより、視線方向の風速 $V_w$ を正確に測定することができるが、以下、視線方向の風速 $V_w$ を正しく補正できていることを検証する。

図2は波長  $\lambda = 1.5 \mu \text{m}$  のパルス光を例にして、各送信パルス幅(0.25  $\mu \text{sec}$ , 0.5  $\mu \text{sec}$ , 1.0  $\mu \text{sec}$ )に対する周波数偏移 $f_{\text{chirp}}$ と、式(2)に基づいて計算された速度オフセットである $\Delta V_{\text{offset}}$ の一例を示している。

[0024] 図3は風速オフセット補正の検証実験に用いた装置のレイアウトを示しており、図3の例では、風杯式風向風速計102を測定風速の基準として用い、光波レーダ101と同時に測定を行っている。

ただし、滑らかでない地表付近で生じる風速場の空間的乱れを避けるため、風杯式風向風速計102を地上30mのタワー上に設置し、そのタワーから184m離れた高さ10mの建物屋上に光波レーダ101を設置して、送信レーザを風杯式風向風速計1

02の設置点とほぼ同一の観測空間103に照射して風速を測定している。光波レーダ101の測定距離分解能は37.5m、このときのパルス幅は0.25μs、オフセット補正量は0.77m/sである。

[0025] また、風杯式風向風速計102の風速と風向の測定値から、光波レーダ101の送信レーザの照射方向(視線方向)に対応する風速成分を算出して、速度オフセットの補正後の光波レーダ測定値と比較している。

図4は風速オフセット補正の検証実験結果を示している。

図4(a)は両測器の測定風速の時系列データ111, 112(5秒平均、398点)を示し、図4(a)から風速の時間的変動の傾向がよく一致している事がわかる。

図4(b)は両測器の測定値の差分を示し、両測器の差分の平均値と標準偏差は各々0.035m/s, 0.332m/sであり、差分の平均値0.035m/sはオフセット補正值0.77m/sに比べて一桁小さい。

のことから、速度オフセット補正が正しく行われていることが分かる。

[0026] 以上の速度オフセットの発生原因が、後述する実施の形態3で述べる自己位相変調による送信光周波数偏移である場合には、オフセット補正量は、パルス光の通過するファイバの特性、パルス光の形状及びパワーから一意に決まる。

この状況下で、特定の送信パルス条件に固定して風速測定を行う場合、予め図2のようにパルス光のパルス出射条件(パルス波形、パルスパワー)毎にパルス光の周波数偏移を測定してテーブルに格納し、そのテーブルから送信対象のパルス光に対応する周波数偏移を読み出し、その周波数偏移に対応する系統誤差を風速から減算するようにしてもよい。

この場合、光波レーダの送信光路上にパルス光の周波数偏移を推定する手段(例えば、周波数偏移検出部12、荷重平均処理部13)が不要となるため、送信光路の損失を低減することができるとともに、部品点数削減による低コスト化や、製作性と信頼性を高めることができる効果を奏する。

[0027] 実施の形態2.

図5はこの発明の実施の形態2による光波レーダ装置を示す構成図であり、図において、図1と同一符号は同一または相当部分を示すので説明を省略する。

光路分岐部21は光路分岐部3から出力された周波数 $\nu$ の局部発振光と光路分岐部7から出力された周波数( $\nu + f_{\text{chirp}}$ )のパルス光とを合成し、その合成光をヘテロダイン受信器22に出力する。

ヘテロダイン受信器22は光路分岐部21から出力された合成光の強度の交流成分を検出する。また、ヘテロダイン受信器22は、その合成光の強度信号には両者の和周波数成分( $2\nu + f_{\text{chirp}}$ )と差周波数成分 $f_{\text{chirp}}$ とが含まれているので、差周波数成分のみを電気信号に変換し、その電気信号から周波数偏移 $f_{\text{chirp}}$ を検出する。

なお、光路分岐部7、21、ヘテロダイン受信器22及び荷重平均処理部13から周波数偏移検出手段が構成されている。

- [0028] 上記実施の形態1では、周波数偏移検出部12が光路分岐部7から出力されたパルス光の一部から周波数偏移 $f_{\text{chirp}}$ を検出するものについて示したが、光路分岐部21が光路分岐部3から出力された局部発振光と、光路分岐部7から出力されたパルス光とを合成し、ヘテロダイン受信器22がその合成光から周波数偏移 $f_{\text{chirp}}$ を検出するようしてもよい。
- [0029] 以下、局部発振光とパルス光を合成し、その合成光から周波数偏移 $f_{\text{chirp}}$ を検出する場合の実験例について説明する。

図6は全光ファイバ形光波レーダ装置における送信光の周波数偏移評価系を示すブロック図である。

光路分岐部202が、基準光源であるDFB(Distributed Feed Back)−ファイバレーザ201から出力されたスペクトル幅24. 8kHzの連続光を分岐し、その連続光の大部分をパルス変調器であるAOMs(Acousto−Optic Modulator)203に出力する。

AOMs203は、スペクトル幅24. 8kHzの連続光を受けると、その連続光からパルス幅が $1\mu\text{s}$ 、ピークパワーが1mWのパルス光を切り出すと同時に、そのパルス光の周波数に+100MHzの周波数シフトを与える。

- [0030] 光ファイバ増幅器であるEDFA(Erbium Doped Fiber Amplifier)205は、AOMs203から出力されたパルス光のピーク出力を14Wに増幅し、方向性結合部である光ファイバ形のサーチュレータ206を介して、そのパルス光を送受信望遠鏡207

に出力する。

この実験例では、送信光であるパルス光の周波数偏移を、送受信望遠鏡207の直前の光ファイバ端208に反射される内部反射光を光ヘテロダイン検出することにより評価している。

[0031] 即ち、ヘテロダイン受信器210が光路分岐部209を介して、DFB-ファイバレーザ201から出力された連続光の一部と、光ファイバ端208に反射された内部反射光とを受けると、その連続光の一部と内部反射光をヘテロダイン検波し、そのヘテロダイン検出信号をデジタルストレージオシロスコープであるDSO211に出力する。

DSO211は、ヘテロダイン受信器210からヘテロダイン検出信号を受けると、サンプリングレート1GS/sで内部反射光ビート信号付近の1280点の時系列データを取得する。

次に、256点ずつオフラインでFFT処理を実施してスペクトルを抽出する。

そして、DSO211は、各スペクトルのピーク周囲で重心演算を実施して、それぞれのFFT期間毎に中心周波数を算出する。

[0032] 図7は内部反射光のヘテロダイン検出信号の時系列データ(左)と周波数解析結果(右)を示す説明図である。

特に(a)は送信光をEDFAを用いてパルス光を出力した場合の結果であり、時系列期間A, B, Cに対応する中心周波数を見ると、時系列期間B付近の周波数が時系列期間A, Cの周波数よりも1.5MHz程度低いことがわかる。

これに対して、(b)は送信光をCW(Continuous Wave)出力させた場合の結果であり、評価期間内で有意な周波数偏移がないことが確認できる。

[0033] さらに(a)の周波数偏移の原因がEDFA以降で発生しているか否かを確認するため、AOMsの出力パルス光(ピークパワー1mW)に適当な減衰をかけてヘテロダイン検出を行っている((c)を参照)。

その結果、(a)で周波数偏移が生じていた時系列期間Bにおいても有意な周波数偏移がないことがわかる。

以上のことから、EDFAにより増幅されたパルス光に限り、系統的に発生する周波数偏移を検出できていることがわかる。

[0034] この評価実験では、送信光の一部を取り出す方法として、光路分岐部7の代わりに、光ファイバ端面208からの反射光を用いているが、これに限るものではなく、光導波手段と光送受信手段間の内部反射点からの反射光を用いればよい。

例えば、サーチュレータ206の内面反射、送受信望遠鏡207の内面反射など、反射率が一定でかつ、反射位置が時間的に移動しない場合であれば、適用可能である。

この場合、光路分岐部7を取り去ることができるため、送信光路の損失を低減できるとともに、部品点数削減による低コスト化や、製作性と信頼性を高めることができる効果を奏する。

また、内部反射点からの反射光と、測定対象である距離Z[m]のエアロゾルによる散乱光とはヘテロダイン検出信号の時系列データ内で異なる時刻に現れるので、解析する時系列期間をパルス出力直後とパルス出力から $2Z/c$ 秒後の各信号を時分割で解析してもよい。但し、cは光速を表す。この場合、内部反射光とエアロゾル散乱光の周波数解析を同一のヘテロダイン受信器で行うことができる。

従って、ヘテロダイン受信器10, 22を共用することができるため、部品点数削減による低コスト化や製作性と信頼性を高める効果を奏する。

[0035] 実施の形態3.

図8はこの発明の実施の形態3による光波レーダ装置を示す構成図であり、図において、図1と同一符号は同一または相当部分を示すので説明を省略する。

強度検出部23は光路分岐部7から出力された光信号の強度を検出する。

ゼロドップラ周波数補正值算出部24は強度検出部23により検出された強度の時間変化から周波数偏移 $f_{\text{chirp}}$ を検出し、その周波数偏移 $f_{\text{chirp}}$ から系統誤差 $\Delta V_{\text{offset}}$ を求める。

[0036] 上記実施の形態2では、光路分岐部21が光路分岐部3から出力された局部発振光と光路分岐部7から出力されたパルス光を合成し、ヘテロダイン受信器22がその合成光をヘテロダイン検波して、周波数偏移 $f_{\text{chirp}}$ を検出するものについて示したが、送信パルス光の周波数偏移の原因が伝送路内での自己位相変調によることを先驗情報として用いることで、送信光強度の時間変化から周波数偏移を推定するようにし

てもよい。

具体的には、下記の通りである。

[0037] パルス光を光学媒質に入射するとKerr効果により、光強度に応じて屈折率が時間的に変化する。

自己位相変調の一般式は、光の電場Aが光ファイバの伝搬方向に対してゆっくりと変化する場合(Slowly varying 近似)、次の伝搬方程式から導き出せる。

[数1]

$$i \frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{i}{2} \alpha A + \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \frac{2\pi}{\lambda} \gamma |A|^2 A \quad (3)$$

ただし、 $\alpha$ は光ファイバでの減衰、 $\lambda$ は波長、 $\beta_2$ は屈折率分散によるパルス幅増加因子を示している。

[0038] 式(3)の右辺第三項は、次の式(4)で表される非線形光学係数 $\gamma$ を含む非線形光学効果を示している。

[数2]

$$\gamma = \frac{n_2 \omega_0}{c A_{\text{eff}}} = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{n_2}{A_{\text{eff}}} \quad (4)$$

ただし、cは光速、 $A_{\text{eff}}$ は光ファイバ有効コア面積、 $P_0$ はパルス光のピークパワー、 $\omega_0$ は光の周波数、 $n_2$ は3次非線形分極に関する非線形屈折率を示している。

[0039] 自己位相変調を考えるため $\beta_2 = 0$ (ゼロ分散)を仮定し、さらに光の電場Aを次の式(5)の規格化振幅Uで表すと、規格化振幅Uの解は式(6)で表される。

[数3]

$$A(z, T) = \sqrt{P_0} \exp[-\alpha z/2] U(z, T) \quad (5)$$

$$U(z, T) = U(0, T) \exp[i \phi_{NL}(z, T)] \quad (6)$$

ここで、U(0, T)は伝搬距離z=0における規格化振幅を示し、 $\phi_{NL}$ は次の式(7)で表される非線形位相偏移を示している。

[数4]

$$\phi_{NL}(z, T) = |U(0, T)|^2 \frac{L_{eff}}{L_{NL}} \quad (7)$$

[0040] また、 $L_{eff}$  は実効的伝搬距離、 $L_{NL}$  は非線形長を示し、それぞれ下記の式(8)、式(9)で表される。

[数5]

$$L_{eff} = \frac{1 - \exp[-\alpha L]}{\alpha} \quad (8)$$

$$L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_0} \quad (9)$$

[0041] 一方、非線形位相偏移  $\phi_{NL}$  の時間変化は光の周波数偏移(チャーブ)として現れる。

[数6]

$$f_{chirp} = -\frac{1}{2\pi} \frac{\partial \phi_{NL}(z, T)}{\partial T} = -\frac{1}{2\pi} \left( \frac{L_{eff}}{L_{NL}} \right) \frac{\partial}{\partial T} |U(0, T)|^2 \quad (10)$$

これにより、送信パルス光の立ち上がり部分(  $|U(0, T)|^2$  の微係数が正の期間)では光の周波数は減少方向に偏移し、パルス立下り部分では増加方向に変移する。

波長  $1.5 \mu m$  で考えると、通常のシングルモード光ファイバの損失  $\alpha$  は  $-0.2 dB/km$  程度であり、数  $10m$  程度のファイバ長に対しては無視でき、 $L_{eff}$  は光ファイバ長  $L$  に近似できる。

このため、周波数偏移は、パルス光のピークパワー  $P_0$ 、ファイバ長  $L$ 、非線形屈折率  $n_2$  のパルスの時間変化率  $d |U|^2 / dt$  に比例し、光ファイバの有効コア面積  $A_{eff}$  に反比例する特性を有することが分かる。

[0042] 以上の特性を先駆情報として用いることにより、送信光の周波数偏移を推定する。

図9は周波数偏移  $f_{chirp}$  の推定手順を示すフローチャートである。

まず、ゼロドップラ周波数補正值算出部24は、対象とする光の波長  $\lambda$  を設定し、光周波数  $\omega_0$  を算出する(ステップST1)。

$$\omega_0 = c / \lambda \quad (11)$$

また、ゼロドップラ周波数補正值算出部24は、使用する光ファイバ2のパラメータである実効的コア面積 $A_{\text{eff}}$ 、ファイバ長 $L$ 、非線形屈折率 $n_2$ を設定する(ステップST2)。

[0043] ゼロドップラ周波数補正值算出部24は、強度検出部23により検出された光パルスの強度、即ち、送信パルス光のピークパワー $P_0$ と規格化強度時間波形 $|U(0, T)|^2$ を取得する(ステップST3)。

そして、ゼロドップラ周波数補正值算出部24は、ステップST1で算出した光周波数 $\omega_0$ 、ステップST2で設定したパラメータ、ステップST3で取得したピークパワー $P_0$ と規格化強度時間波形 $|U(0, T)|^2$ を式(4)、(8)～(10)に代入することにより、周波数偏移 $f_{\text{chirp}}$ を算出する(ステップST4)。

ゼロドップラ周波数補正值算出部24は、周波数偏移 $f_{\text{chirp}}$ を算出すると、図1の荷重平均処理部13と同様に、その周波数偏移 $f_{\text{chirp}}$ の荷重平均を求め、荷重平均後の周波数偏移 $f_{\text{chirp}}$ から系統誤差 $\Delta V_{\text{offset}}$ を求める。

[0044] 上記の関係式の妥当性を実験により検証している。実験に用いた光波長は $\lambda = 1540\text{nm}$ であり、伝送用のファイバパラメータとしてEr添加光ファイバ( $A_{\text{eff}} = 65\text{ }\mu\text{m}^2$ 、 $L = 12\text{m}$ )と、伝送用のコア拡大光ファイバ( $A_{\text{eff}} = 130\text{ }\mu\text{m}^2$ 、 $L = 12\text{m}$ )とを接続している。

非線形屈折率は標準的なシングルモード光ファイバの値( $n_2 = 2.6 \times 10^{-20}\text{m}^2/\text{W}$ )を仮定して用いている。

[0045] 図10は送信光の出力パルス強度波形を示している。

ピークパワー $P_0$ は14Wである。強度時間微分を数値的に行って $|U(0, T)|^2$ を算出し、上記のパラメータ $P_0$ 、 $A_{\text{eff}}$ 、 $L$ 、 $n_2$ を式(4)、(8)～(10)に代入して算出した結果を図11の実線で示している。図11の点線で表した光ヘテロダイン検出による周波数偏移の実測値(実施の形態2における図7(a)右で説明した実測結果)とよく一致していることが分かる。

以上の評価結果から、この実施の形態3により周波数偏移が正しく推定できていることが分かる。

[0046] この実施の形態3による周波数偏移の推定方法では、ヘテロダイン受信器22が不要となり、初期パラメータの設定と光強度の時間波形測定のみにより、周波数偏移の推定が行えるため、装置が簡便になる効果を奏する。

また、この実施の形態3では、光強度信号を検出する際、送信光路に光路分岐部7を用いることを想定しているが、送信用光ファイバの出射端面の近傍にある光学部品による反射光、例えば、出射ファイバ端面や光方向性結合部6での内面反射など、反射率が一定となる場所からの内部反射光を用いてもよい。この内部反射光のレベルを予め校正しておくことで送信光強度信号をモニタすることができる。

このように、内部反射光を利用する場合、送信光路内の光路分岐部7が不要となり、装置構成が簡便になるだけではなく、送信光路の挿入損失を低減することができる効果を奏する。

[0047] 実施の形態4.

上記実施の形態3では、送信パルス光の周波数偏移の原因が伝送路内での自己位相変調によることを先駆情報として用いて、周波数偏移を推定するものについて示したが、送信光自己位相変調に伴う周波数偏移を低減する方法について述べる。

即ち、上記実施の形態3で説明した送信光の自己位相変調に伴う周波数偏移 $f_{\text{chirp}}$ は、式(4)、(8)～(10)を見ると、周波数偏移 $f_{\text{chirp}}$ がパルス光のピークパワー $P_0$ 、ファイバ長 $L$ 、パルスの時間変化率 $d|U|^2/dt$ に比例し、光ファイバの実効的コア面積 $A_{\text{eff}}$ に反比例する特性を有している。

そこで、この実施の形態4では、光ファイバ長 $L$ を短くすることで周波数偏移自身を小さくするようにしている。

[0048] 送信光の周波数偏移量の上限を $|\Delta f_c|$ とするための光ファイバ長 $L$ は次の式(12)の範囲で与えられる。即ち、光ファイバ長 $L$ を式(12)の右辺が示す基準値より小さくする。

[数7]

$$L \leq |\Delta f_c| \cdot 2\pi \frac{cA_{\text{eff}}}{n_2 \omega_0 P_0} \cdot \frac{1}{\left| \frac{\partial}{\partial T} |U(0, T)|^2 \right|} \quad (12)$$

[0049] この実施の形態4によれば、使用する光パルスの時間特性と、使用する光ファイバの材料パラメータとから所望の周波数偏移範囲に応じた最大の光ファイバ長を見積ることができ、ファイバ長により機器配置検討に効果的な指針を与えることができる効果を奏する。

[0050] 実施の形態5。

上記実施の形態4では、送信パルス光の周波数偏移の原因が伝送路内での自己位相変調によることを先駆情報として用いて、送信光ファイバ長を短縮することにより周波数偏移を小さくするものについて示したが、実効的コア面積を増大することにより周波数偏移を小さくするようにしてもよい。

即ち、上記実施の形態3で説明した送信光の自己位相変調に伴う周波数偏移 $f_{\text{chirp}}$ は、式(4)、(8)～(10)を見ると、周波数偏移 $f_{\text{chirp}}$ がパルス光のピークパワー $P_0$ 、ファイバ長 $L$ 、パルスの時間変化率 $d|U|^2/dt$ に比例し、光ファイバの実効的コア面積 $A_{\text{eff}}$ に反比例する特性を有している。

そこで、この実施の形態5では、光ファイバの実効的コア面積 $A_{\text{eff}}$ を大きくすることで周波数偏移自体を小さくするようにしている。

[0051] 送信光の周波数偏移量の上限を $|\Delta f_c|$ とするための光ファイバの実効的コア面積 $A_{\text{eff}}$ は次の式(13)の範囲で与えられる。即ち、光ファイバの実効的コア面積 $A_{\text{eff}}$ を式(13)の右辺が示す基準値より大きくする。

[数8]

$$A_{\text{eff}} \geq \frac{1}{|\Delta f_c|} \cdot \frac{n_2 \omega_0 P_0}{2\pi c} \cdot \left| \frac{\partial}{\partial T} |U(0, T)|^2 \right| \quad (13)$$

あるいは、式(13)を変形して、光ファイバの非線形定数 $n_2/A_{\text{eff}}$ を次の式(14)の範囲となるように光ファイバの特性を選定、あるいは、設計すればよい。

[数9]

$$\frac{n_2}{A_{\text{eff}}} \leq |\Delta f_c| \cdot 2\pi \frac{c}{L \omega_0 P_0} \cdot \left| \frac{1}{\frac{\partial}{\partial T} |U(0, T)|^2} \right| \quad (14)$$

[0052] この実施の形態5によれば、使用する光パルスの時間特性と、使用する光ファイバ

の材料パラメータとから所望の周波数偏移範囲に応じた最小の光ファイバ実効的コア面積 $A_{\text{eff}}$ あるいは非線形定数 $n_2 / A_{\text{eff}}$ を見積ることができ、送信光路に使用する光ファイバの選定や設計検討に効果的な指針を与えることができる効果を奏する。

### 産業上の利用可能性

[0053] 以上のように、この発明に係る光波レーダ装置は、パルス光を空間に放出し、空間内のエアロゾル移動に伴うパルス光の散乱光のドップラシフトによる風速を測定するに際して、その風速を高精度に測定する必要があるものに適している。

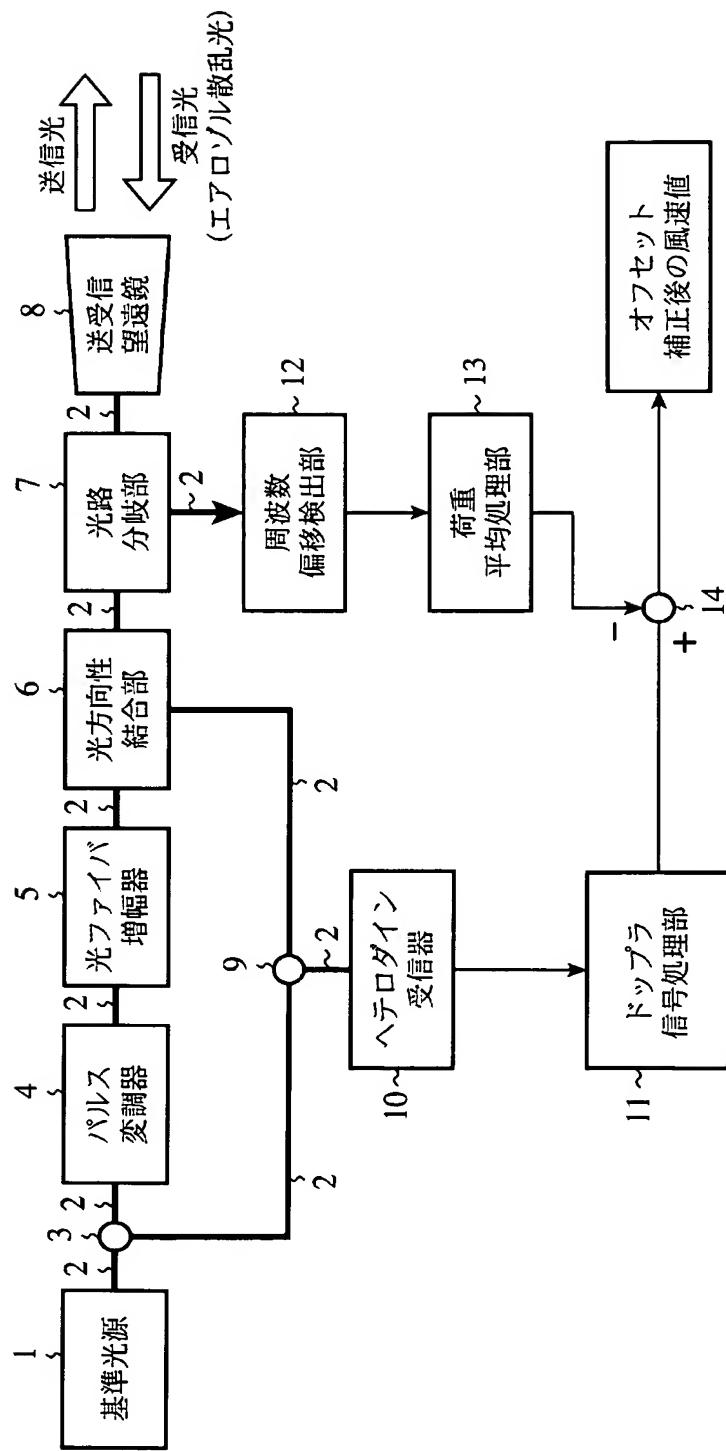
## 請求の範囲

- [1] 光信号を発光する発光手段と、上記発光手段により発光された光信号を伝搬する光導波手段と、上記光導波手段により伝搬された光信号を空間に放とする一方、その空間で散乱された当該光信号の散乱光を収集する光送受信手段と、上記発光手段により発光された光信号の一部と上記光送受信手段により収集された散乱光を合成し、その合成光から視線方向の風速を算出する風速算出手段と、上記発光手段により発光された光信号に対する周波数偏移を検出する周波数偏移検出手段とを備えた光波レーダ装置。
- [2] 周波数偏移検出手段により検出された周波数偏移に応じて風速算出手段により算出された風速を補正する風速補正手段を設けたことを特徴とする請求項1記載の光波レーダ装置。
- [3] 周波数偏移検出手段は、光導波手段により伝搬された光信号から周波数偏移を検出することを特徴とする請求項1記載の光波レーダ装置。
- [4] 周波数偏移検出手段は、発光手段により発光された光信号の一部と光導波手段により伝搬された光信号の一部を合成し、その合成光から当該光信号に対する周波数偏移を検出することを特徴とする請求項1記載の光波レーダ装置。
- [5] 周波数偏移検出手段は、発光手段により発光された光信号の一部と、光導波手段と光送受信手段間の内部反射点に反射された光信号とを合成し、その合成光から当該光信号に対する周波数偏移を検出することを特徴とする請求項1記載の光波レーダ装置。
- [6] 周波数偏移検出手段は、光導波手段により伝搬された光信号の強度を検出し、その強度の時間変化から当該光信号に対する周波数偏移を検出することを特徴とする請求項1記載の光波レーダ装置。
- [7] 周波数偏移検出手段は、予め、パルス形状が相互に異なる複数の光信号に対応する周波数偏移を記憶しているテーブルを備え、そのテーブルから光導波手段により伝搬された光信号に対応する周波数偏移を読み出すことを特徴とする請求項1記載の光波レーダ装置。
- [8] 光導波手段における伝送路の伝搬長が、光信号に対する周波数偏移の許容誤差

と、上記伝送路の有効コア面積及び非線形屈折率と、その光信号の振動数及び強度とから特定される基準値より小さいことを特徴とする請求項1記載の光波レーダ装置。

[9] 光導波手段における伝送路の有効コア面積が、その伝送路の非線形屈折率と、光信号の振動数及び強度と、その光信号に対する周波数偏移の許容誤差とから特定される基準値より大きいことを特徴とする請求項1記載の光波レーダ装置。

[図1]

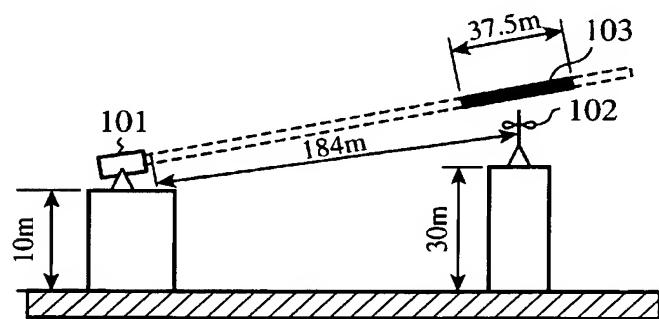


[図2]

波長  $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$  のパルス送信光に対する周波数偏移  $f_{\text{chirp}}$  と  
式 (2) に基づき計算した速度オフセット  $\Delta V_{\text{offset}}$  の一例

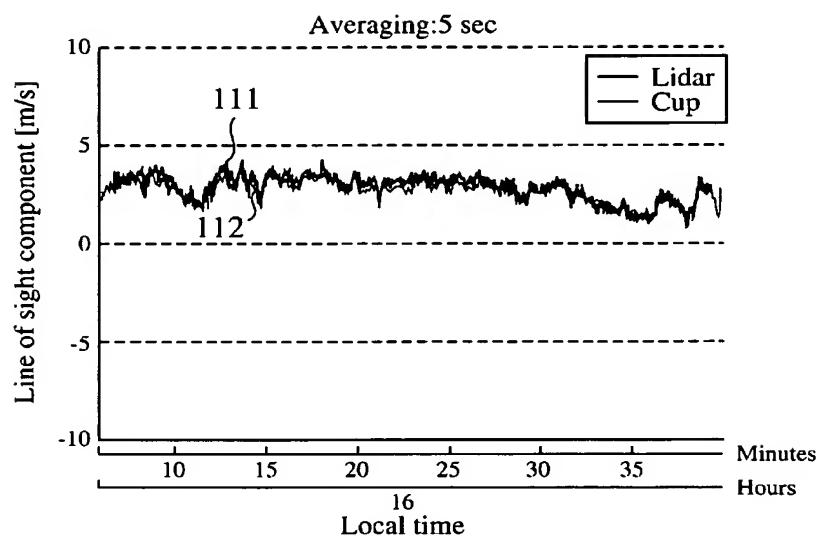
測定距離 分解能 [m]	送信光 パルス幅 [ $\mu\text{sec}$ ]	送信光 周波数偏移 [MHz]	オフセット 風速 [m/s]
37.5	0.25	-1.01	0.76
75	0.5	-0.41	0.31
150	1.0	-0.20	0.15

[図3]

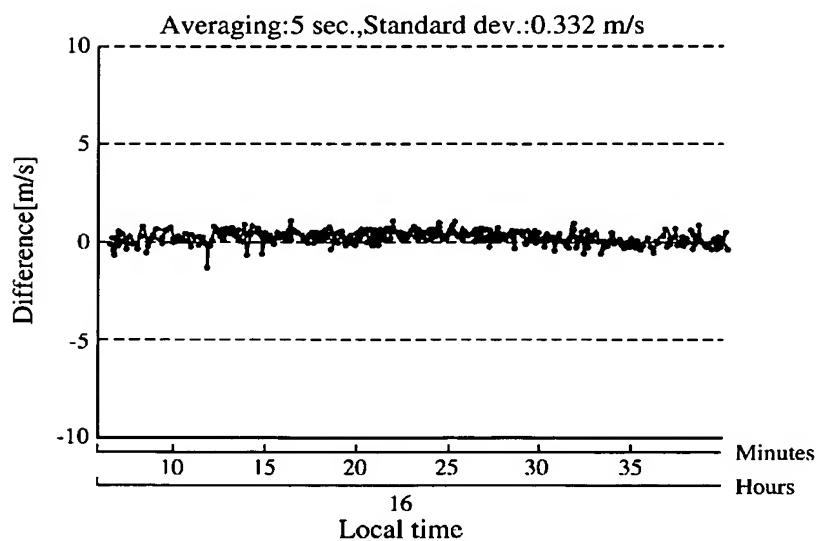


[図4]

(a)



(b)

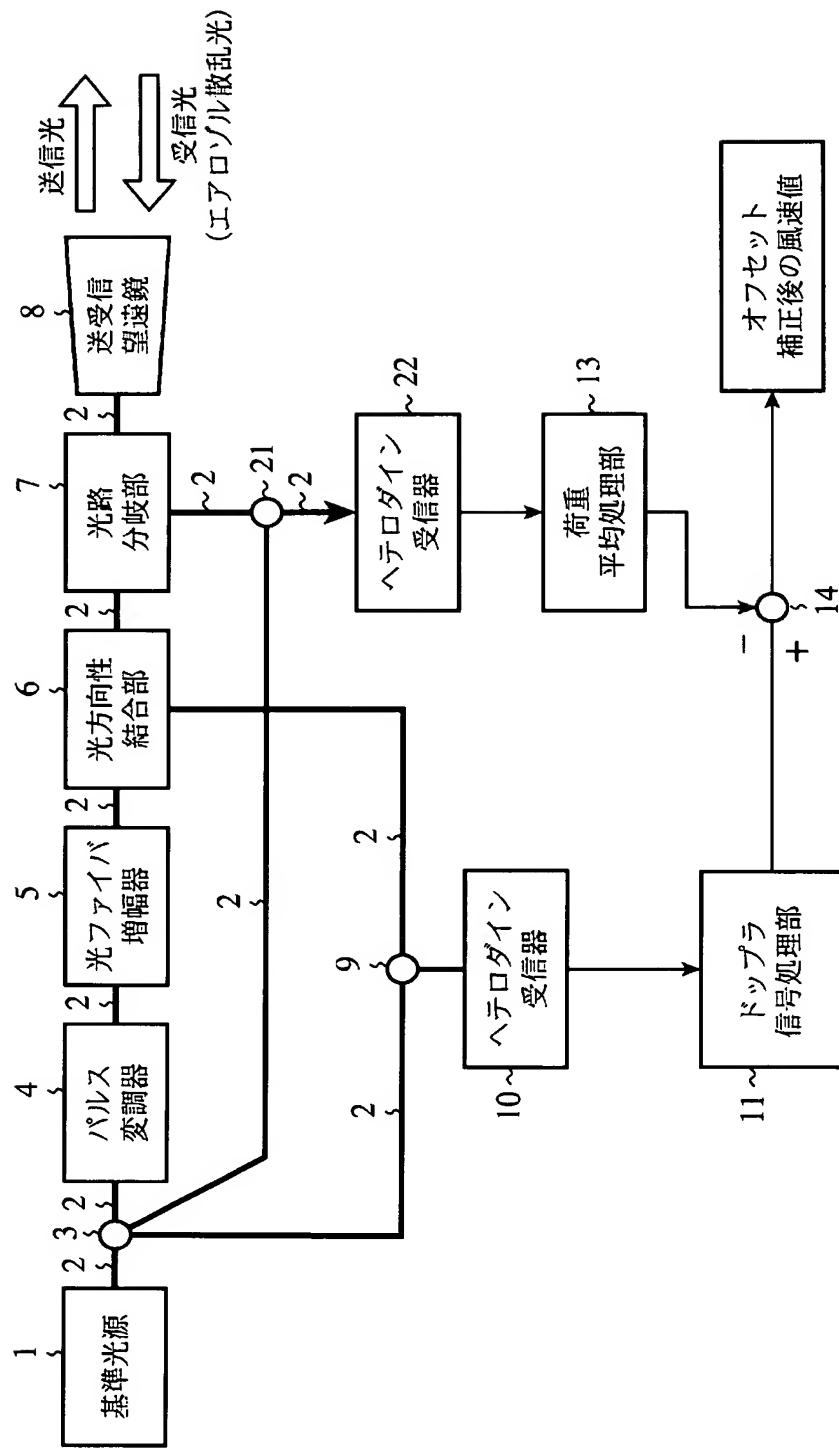


風速オフセット補正の検証実験結果

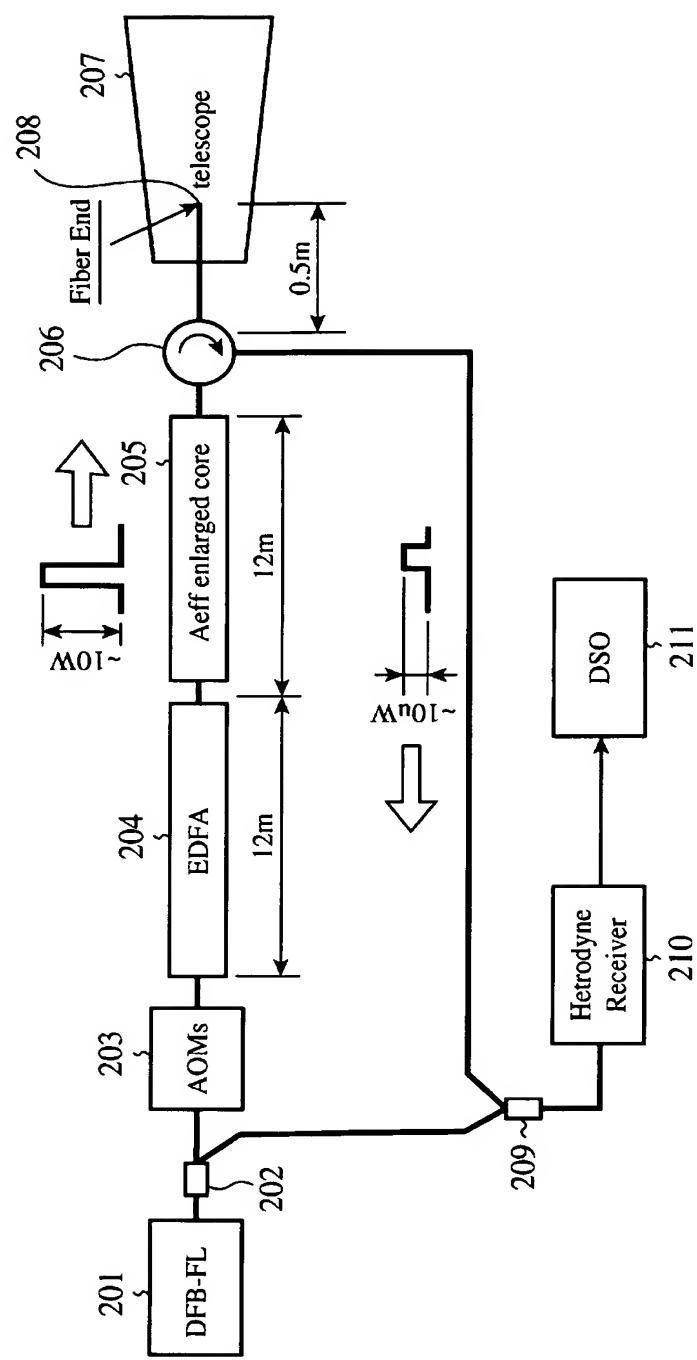
(a)両測器の測定風速の時系列データ (5秒平均、398点)

(b)両測器の測定値の差分

[図5]

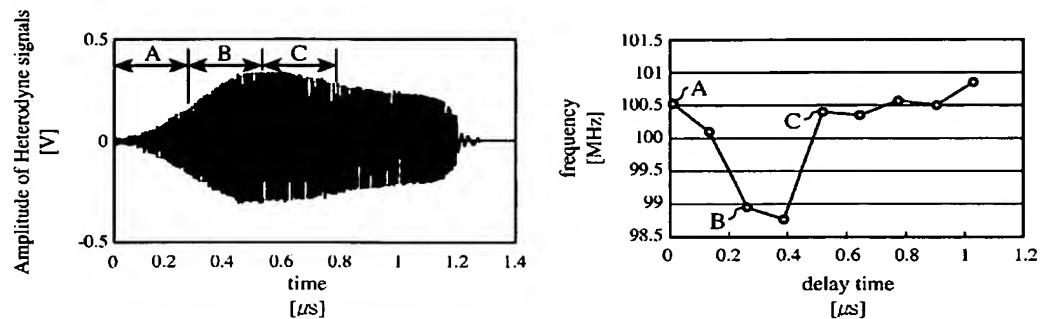


[図6]

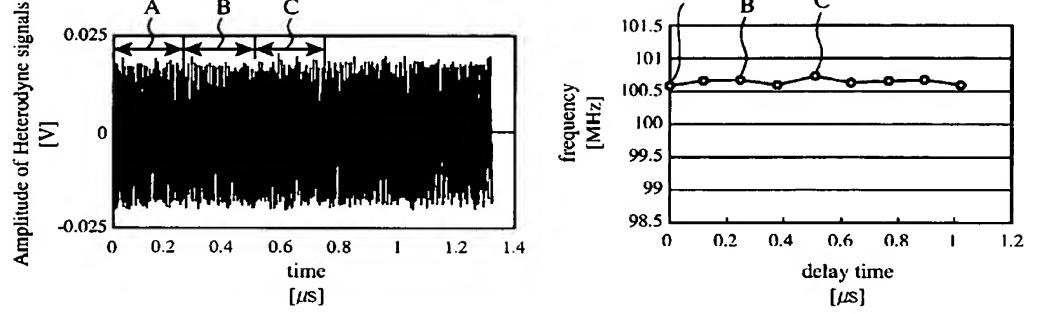


[図7]

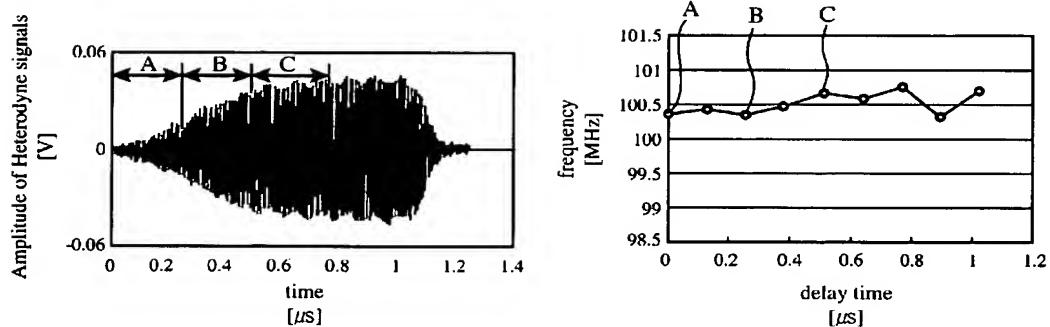
(a)



(b)



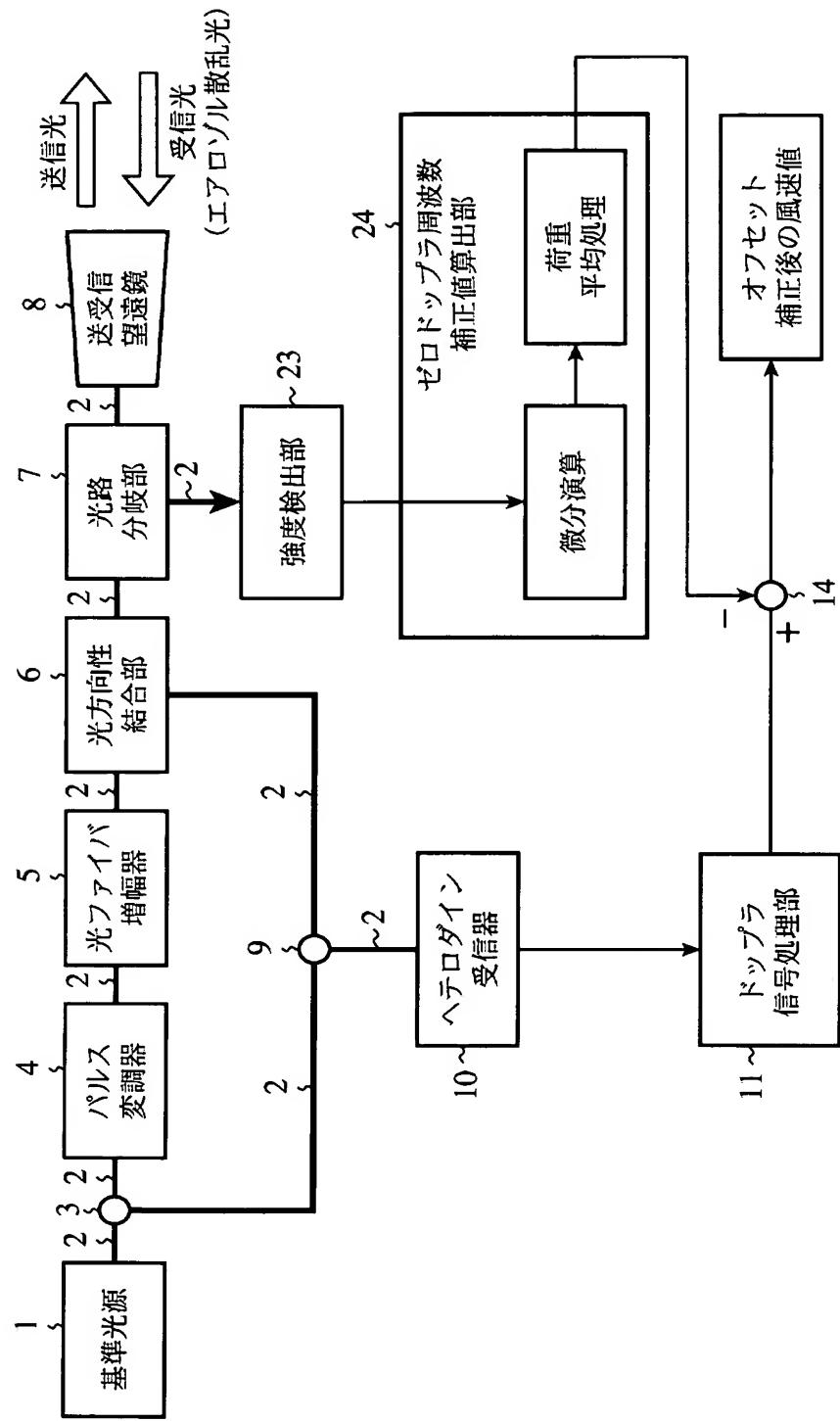
(c)



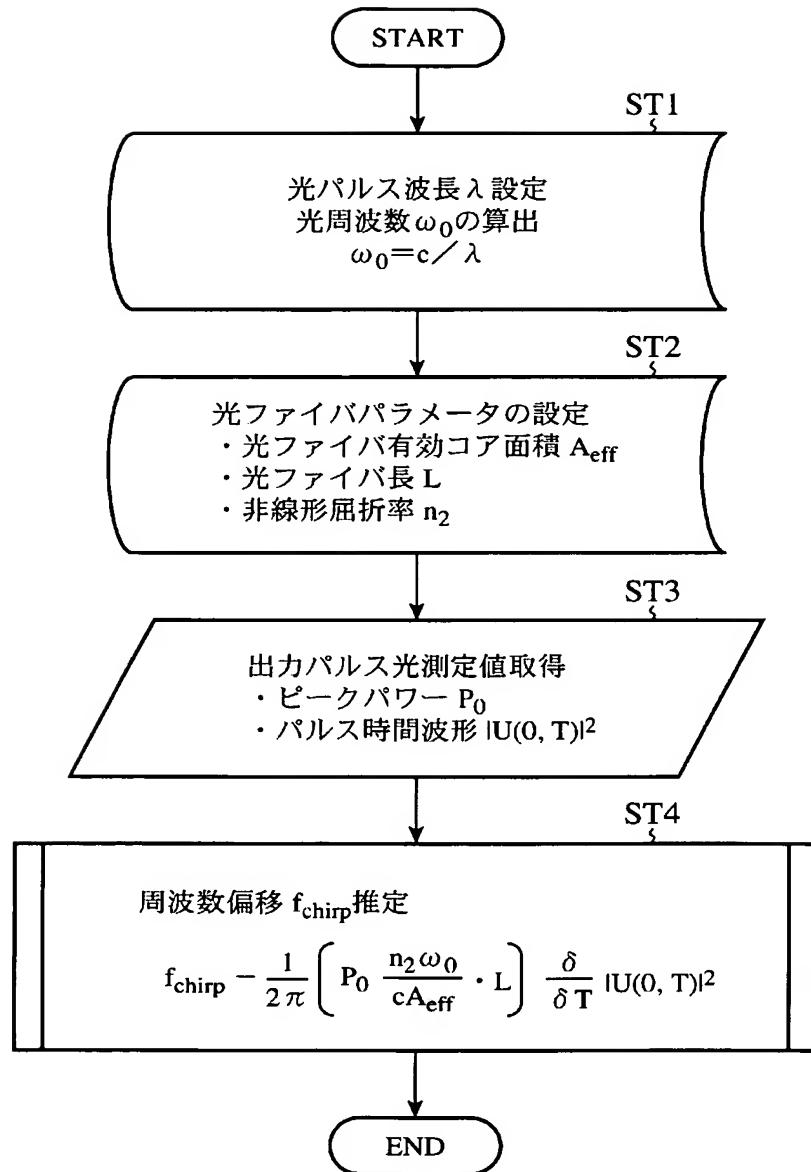
内部反射光のヘテロダイン検出信号の時系列データ（左）と  
周波数解析結果（右）

- (a)送信光をEDFAを用いてパルス出力した場合
- (b)送信光をCW(Continuous Wave)出力させた場合
- (c)AOMの出力パルス光に適当な減衰をかけてヘテロダイン検出した場合

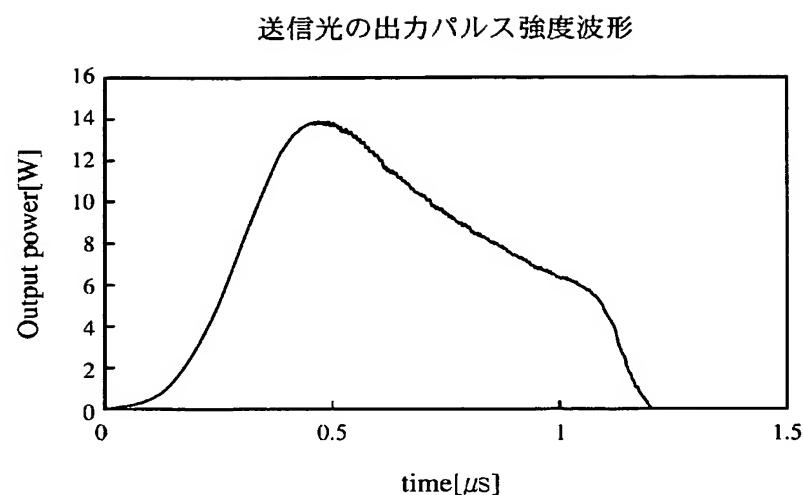
[図8]



[図9]



[図10]



[図11]

